遷移沸騰熱伝達の整理式およびモデルの構築 (第3報)

Derivations of Correlation and Model of Transition Boiling Heat Transfer -3rd Report-

○ 正 大竹 浩靖 (工学院大) 正 小泉 安郎 (工学院大)

Hiroyasu OHTAKE, Kogakuin University, 2665-1, Nakano-machi, Hachioji-shi, Tokyo

Yasuo KOIZUMI, Kogakuin University

The transition boiling heat transfer was examined through a model analysis. Considering a pseudo liquid-solid contact right after detachment of a bubble from liquid-vapor interface as a result of Rayleigh-Taylor instability, transient heat conduction was analyzed in it three dimensionally. A liquid-solid contact time and area were given by a correlation of the fractions of liquid-solid contact in the present transition boiling experiments: $\tau_{\text{contact}}=0.3\Gamma_1$, $A_{\text{wet}}=15 \times 15 \Gamma_1$, $\Gamma=\Gamma_1 \Gamma_2$, $=1.000-0.7771\theta-0.2695\theta^2$, where $\theta=(T_w-T_{\text{CHF}})/(T_{\text{MHF}}-T_{\text{CHF}})$. The prediction by the present model was in agreement with the present experimental data for water.

Key Words: Boiling, Transition Boiling, Modeling, Liquid-Solid Contact Time and Area

1. 緒言 近年、鉄鋼の製造過程の省工程化、原子炉の高出力化に伴うリウエット現象、さらには超電導マグネットのクエンチ現象の把握などにおいて、遷移沸騰熱伝達についての詳細を理解することが必要となり、その関心が高まっている⁽¹⁾。過去 Berenson⁽²⁾より遷移沸騰は不安定な膜沸騰と不安定な核沸騰の共存状態であると指摘された後、多くの研究者らにより固液接触確率の導入およびその計測による遷移沸騰熱伝達の定量的取り扱いが試みられてきた。また、最近限界熱流束モデルを拡張することで、遷移沸騰熱伝達の物理モデルの導入が試みられてきた⁽³⁾。以上のように、遷移沸騰熱伝達は様々な検討が行われているものの、その信頼性の高いデータを得ることが技術的に困難であるために、未だ沸騰曲線上で限界熱流束点と極小熱流束点とを直線的に結ぶ以外に評価法がない状態にとどまっている。筆者らのグループは、熱容量と伝熱面積との比が大きな加熱ブロックを用いることで、時間平均的に定常的な遷移沸騰を実現し、そのデータの蓄積を行うとともに、その整理式を提案し⁽⁴⁾、その後第2報として固液接触後の熱輸送に基づく高過熱度領域の遷移沸騰モデルを構築した⁽⁵⁾。本報告は、これらの研究の第3報として、前報で提案した固液接触後の熱伝達特性を接触熱伝導問題として捉えたモデルに壁面過熱度の減少に伴う固液接触面積および時間の変化の影響を考慮した、改良モデルによる計算を試みた。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 実験装置図は前報⁽⁵⁾に譲るが、伝熱面は厚さ60mm、幅15×15mmの銅ブロックであり、試験液体は大気圧下のイオン交換水である。本加熱面系の熱容量・伝熱面積比 $\rho CV/A$ は $2.2 \times 10^5 \text{ J/Km}^2$ である。加熱は銅ブロック底部に埋め込んだ50Wのカートリッジヒーター($\phi 3.2\text{mm}$ 、長さ50.8mm)6本で行った。伝熱面温度、熱流束は、伝熱面表面から5、25、45mmの位置に取り付けられた3本のシース熱電対($\phi 1.0\text{mm}$)の測定値より、一次元フーリエの法則を利用して求めた。

2.2 実験手順 まず蒸気雰囲気中で伝熱面をヒータにより約300℃に加熱する。十分に脱気した飽和水を注いで膜沸騰を発生させ、ヒータへの供給電力を調節することにより定常な膜沸騰を形成する。この後、伝熱面内温度を測定し、熱流束を得る。次にヒータの供給電圧を減少させ、順次より低過熱度の膜沸騰状態の計測を行い、これを膜沸騰崩壊まで繰り返す。伝熱面表面の温度低下率が急激に上昇し、かつ、伝熱面上蒸気膜に乱れが発生したら、ヒータの供給電圧を逆に増加させる。この後、デジタルオシロスコープにより伝熱面温度の経時変化を確認しつつヒータへの供給電圧を随時調節することにより、“時間平均的に定常状態”の遷移沸騰を形成す

る。その後、伝熱面内温度を測定、熱伝達特性を得る。続いて、ヒータの供給電圧を“増加”させ、順次より低過熱度の遷移沸騰状態の計測を行い、これを再び伝熱面表面の温度低下率が急激に上昇し、核沸騰に至るまで繰り返す。

沸騰曲線のヒステリシスの有無を確認するため、常温の伝熱面上に十分脱気した飽和水を満たし、ヒータへの供給電力を徐々に増加させて、まず核沸騰を形成する実験も併せて行った。なお、この実験の場合、伝熱面表面の温度上昇率が急激に上昇した後、ヒータへの供給電圧を減少させ、定常な遷移沸騰を実現する。テクニカルなことではあるが、加熱モードにおいては、順次の遷移沸騰条件を作るためのヒータへの供給電圧の変化量はより小さくしなければならない。

遷移沸騰時の時間平均的な定常の判断基準は、加熱面近傍の温度が $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内、伝熱面内温度が $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 以内に、5分以上維持できた時とした。

2.3 定常遷移沸騰の実験条件 遷移沸騰では、壁面温度と壁面熱流束との関係が負勾配であるため、その定常状態の実現には、一般的に等温加熱面(例えば、ヒートパイプ方式)あるいは特殊な制御系を用いなければならない。しかしながら、加熱面の熱容量を大きくすることで、特殊な制御系を用いずに定常遷移沸騰を実現させた例も報告されている⁽⁶⁾。ここでは、簡単に、3次元熱伝導計算モデルを用いて、定常遷移沸騰の実現条件を検討する。すなわち、ある遷移沸騰条件に対応する壁面温度および熱流束の下、定常な温度分布を形成し、その後壁面に瞬間的な温度擾乱を加え、再び定常状態を維持できるかどうかを熱伝導モデルの計算により調べた。なお、遷移沸騰熱伝達の負勾配特性は、沸騰曲線上で限界熱流束点と極小熱流束点とを直線的に結ぶ相関式で表現した。計算領域は本実験装置と同じく Rayleigh-Taylor の臨界波長である15×15mmを選び、その厚さ δ と初期加熱面温度 T_i (熱流束)を計算パラメータとした。また、初期温度擾乱の大きさは、本実験手順で定常の判断基準として用いた 2°C とした。また、固体物性値には本実験と同様の銅の値を用い、沸騰熱伝達特性は大気圧水のCHF、MHFによりそれを求めた。

図1にその計算結果を、計算パラメータである $T_i-\delta$ に示した。図1より、高い壁面温度、すなわち低い壁面熱流束の時、定常的な遷移沸騰が実現できることがわかる。また、加熱面厚さの減少とともに定常遷移沸騰が実現できる温度領域が狭くなることがわかる。単純なモデルではあるが、加熱面の熱容量を大きくすることで、特殊な制御系を用いずに定常遷移沸騰を実現できることがわかる。なお、本実験では、限界熱流束側から低過熱度・高熱流束領域の定常遷移沸騰も実現できているが、これは前述したようにヒータへの供給電圧の変化量をより小さくしたことにより温度擾乱の大きさを

Fig. 1 Region of steady transition boiling by heat conduction model

Fig. 3 Liquid-solid contact fraction based on CHF and MHF

Fig. 4 Liquid-solid contact fraction based on nucleate boiling and film boiling

Fig. 2 Comparison with models, correlations and experimental results

Fig. 5 Model of transition boiling at high superheat

小さくしたことに対応すると思われる。

3. 実験結果 その詳細は前報⁽⁵⁾に譲ることとして、図2に示すように、前報⁽⁵⁾で提案した固液接触割合に基づく遷移沸騰熱伝達特性の整理式

$$\Gamma = 1.000 - 0.7771\theta - 0.2695\theta^2, \quad (1)$$

$$\text{where } \theta = (T_w - T_{CHF}) / (T_{MHF} - T_{CHF})$$

で、本実験事実をよく表現できることがわかる。なお、図3にCHFとMHFを基準にした固液接触割合の相関式を、図4に(一般的である)核沸騰曲線と膜沸騰曲線を基準にした固液接触割合の相関式を、それぞれ示す。

4. モデリングおよび考察

4.1 高過熱度に対する遷移沸騰モデル 前報⁽⁵⁾の繰返しにはなるが、モデルの詳細を以下に示す。図5に示すように、テ일러不安定に起因する膜沸騰蒸気膜離脱時に、局所的な固液接触が起こると考え、この後の熱輸送を3次元熱伝導モデルにより検討する。前報⁽⁵⁾では、いまだ固液接触にかかわる物理量が明らかにされていないので、適当にその物理量を選び、その数値を変化させることで検討を進めた。すなわち、

固液接触にかかわる物理量の基準値として、固液接触周期 τ を3Hz(0.3s)、固液接触時間 τ_{contact} を0.1sとした。なお、固液接触周期は高過熱度領域遷移沸騰の本実験の膜沸騰蒸気膜離脱周期(約3Hz)より選んだ。検査面積は本実験系およびテ일러不安定の臨界波長を考慮して $15 \times 15 \text{ mm}^2$ とし、濡れは固液接触直後濡れ域の壁面温度を

$$T_i = (T_w + \beta T_{\text{sat}}) / (1 + \beta) \quad \text{where } \beta = \{(\rho c)_l / (\rho c)_w\}^{0.5} \quad (2)$$

とすることにより表現した。濡れ域の熱流束は、局所壁面温度 T_i とブロック温度 ΔT_{sat} 間の熱伝導による熱移動量で算出した。遷移沸騰熱伝達は、この濡れ域熱流束と膜沸騰熱流束の時空間的平均値で求める。固液接触面積 A_{wet} は不明であるため、 1×1 、 2×2 、 $3 \times 3 \text{ mm}$ それぞれに対する計算を行った。

4.2 固液接触面積および時間考慮モデル 本報では、壁面過熱度の減少に伴う固液接触面積および時間の変化の影響を考慮した改良モデルによる計算を試みる。しかしながら、前述したように固液接触にかかわる物理量が明らかにされていないので、本実験から得られた固液接触割合 Γ から推定する。すなわち、固液接触のエルゴート性を仮定して、

$$\Gamma = \Gamma_a \Gamma_t, \quad \Gamma_a = \Gamma_t = \Gamma^{0.5}. \quad (3), (4)$$

面積の基準としてテ일러不安定の臨界波長による $15 \times 15 \text{ mm}^2$ 、時間の基準として膜沸騰蒸気膜離脱周期 $3 \text{ Hz} (= 0.3 \text{ s})$ を選ぶと、

$$\text{固液接触面積: } A_{\text{wet}} = \Gamma^{0.5} \times 15 \times 15 \text{ [mm]}, \quad (5)$$

$$\text{固液接触時間: } \tau_{\text{contact}} = \Gamma^{0.5} \times 0.3 \text{ [s]}. \quad (6)$$

以上を上記熱伝導モデルに加え、計算した。

4.3 計算結果および考察 図2にそれぞれの計算結果を併記した。前報で報告した固液接触面積固定モデルでは、計算値に及ぼす過熱度依存性は、実験事実と逆傾向をもつ。一方、固液接触面積・時間考慮モデルでは、過熱度の減少とともに計算値が上昇する。また、壁面過熱度 $100 \sim 80 \text{ K}$ の範囲では、本実験結果と定量的にも近い。なお、一般的である核沸騰曲線と膜沸騰曲線を基準とした固液接触割合 Γ_{nf} の相関式(図4中)を適用すると、そのモデル計算値は実験結果と定性的な一致はよいものの定量的には過小評価する。Post-CHFの核沸騰熱流束を過大評価することによる固液接触面積の過小評価が主因と考えられるが、今後より詳細な固液接触の物理量の検討が必要とされる。

5. 結論 遷移沸騰の整理式およびモデル構築を検討し、(1)熱伝導モデルにより、加熱面の熱容量を大きくすることで特殊な制御系を用いずに定常遷移沸騰を実現できることを検証し、(2)固液接触後の熱輸送に、壁面過熱度による固液接触面積および時間の変化の影響を考慮した改良モデルを提案し実験事実をよく表現できることを示した。

参考文献 (1) 機械学会編, 沸騰熱伝達と冷却, 日本工業出版. (2) Berenson, P.J., Int. J. Heat Mass Transf., 5(1962), 985. (3) 西尾・永井, 機論B, 58(1992), 1489. (4) 大竹・本郷・小泉, 第39回熱シンポジウム論集, 1(2002), 171. (5) 大竹・本郷・小泉, 2002年度熱工学講演会, (2002), 171. (6) Bui, T.D. and Dhir, V.K., Trans. ASME, 107(1985), 756.